

LA GALLERIA

NAZIONALE

La Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma

MINISTERO DEI BENI E DELLE ATTIVITA' CULTURALI E DEL TURISMO

Piano Stralcio "Cultura e Turismo"
Fondo per lo Sviluppo e la Coesione (FSC) 2014-2020
Art. 1 c. 703 della L. 23 dicembre 2014, n. 190
(Legge di Stabilità 2015)

**ADEGUAMENTO STRUTTURALE E IMPIANTISTICO E ALLESTIMENTO
ALA COSENZA**
Attuazione dell'intervento n.14

PROGETTO ESECUTIVO

- I° Stralcio -

DEMOLIZIONI DI SUPERFETAZIONI E RIMOZIONI VARIE

Direttore:
Dott.ssa Cristiana Collu

Il Responsabile del Procedimento:
Dott.ssa Cristiana Collu

Supporto al RUP:
Ing. Giuseppe Silvestri

Il Progettista:
Arch. Alessandro Maria Liguori

Il Progettista Strutturale (Opere provvisorie):
Ing. Giuseppe Fabiano

Il Coordinatore per la Sicurezza:
Ing. Pietro Servadio



Codice Elab.

D-007

Titolo Elab.

**RELAZIONE GEOTECNICA
(Opere strutturali provvisorie)**

Scala

-

Data

15/05/2017

Revisione

Data

Descrizione

Emesso

01

Nov-2017

Integrazioni per validazione

G. Fabiano

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 1/23

INDICE

1.	PREMESSA E OGGETTO	2
2.	NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3.	INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA GEOTECNICO	4
4.	CRITERI GENERALI PER ESEGUIRE LE VERIFICHE GEOTECNICHE	6
5.	MODELLO DI SOTTOSUOLO PER L'ANALISI GEOTECNICA	10
6.	CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI.....	13
7.	VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PARATIA DI PALI.....	18
8.	CONTROLLI E PRESCRIZIONI DI SICUREZZA	22

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 2/23

1. PREMESSA E OGGETTO

Nella presente Relazione Geotecnica si descrive la caratterizzazione fisico meccanica dei terreni interessati dai lavori di demolizione del fabbricato denominato “Manica Breve”, tuttora non ultimato, posto a ridosso della porzione Nord dell’Ala Cosenza (progetto Architetto Luigi Cosenza, inizi anni '70) del complesso della Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma.

I lavori in programma comprendono la demolizione della struttura metallica, la demolizione dei solai, la demolizione delle travi di fondazione, l’asportazione di uno strato di terreno compreso fra le travi e l’eventuale parziale scapitozzatura dei pali di fondazione.

Per garantire la sicurezza dell’area interessata dalle demolizioni e della Manica Lunga, è stato previsto la messa in sicurezza della struttura di presidio esistente lato Nord.

Questa struttura di presidio e sicurezza, è costituita da una paratia di contenimento, formata da una doppia fila di pali con diametro 0.8 m, collegati in sommità da una robusta trave di cordolo. In mancanza di informazioni dettagliate sulle fasi costruttive della paratia e del fabbricato da demolire, non è noto se queste due strutture siano interagenti. Per tale motivo, per la sicurezza dell’area di lavoro è stato previsto il rinforzo della paratia mediante posa in opera e tesatura di tiranti provvisori, ancorati e bloccati mediante idonea struttura di ripartizione all’esistente paratia.

Allo stato attuale la caratterizzazione geotecnica dei terreni è sviluppata sulla base di dati desunti dalla letteratura e dei risultati di una indagine pregressa eseguite nell’area di interesse; si tratta, in dettaglio, di informazioni desunte dai documenti sottoposti a controllo tecnico nell’ambito di attività di supporto al RUP ai fini della validazione di un progetto di interventi dell’area della GNAM.

La presente relazione è parte integrante della Relazione di calcolo (elaborato D-008_01).

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 3/23

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La presente relazione ed i calcoli geotecnici finalizzati alle verifiche di sicurezza sono coerenti con il quadro normativo vigente. In particolare, è stato attribuito valore cogente alle prescrizioni dei seguenti documenti di legge:

- D.M. 14 gennaio 2008, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”;
- Circolare 02 febbraio 2009 n. 617, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Istruzioni per l'applicazione delle “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni” di cui al D.M. 14 gennaio 2008.

In armonia con le prescrizioni di tali norme, i calcoli sono sviluppati con l'obiettivo di verificare che siano sempre garantite le condizioni di sicurezza nei riguardi dello stato limite ultimo (SLU) e di quello di esercizio (SLE).

Nel caso in esame, le analisi geotecniche sono indirizzate alla verifica delle condizioni di sicurezza della paratia di pali nei riguardi dello SLU che si attinge con la rotazione rigida della struttura verso valle. Per sviluppare i calcoli si è fatto riferimento ad uno schema piano che riproduce la geometria descritta negli elaborati grafici ed è stata utilizzata una procedura di calcolo automatico implementata nel codice commerciale Paratie. Con tale procedura si ricava la risposta dell'opera di sostegno tenendo conto del progressivo accumulo delle deformazioni con il progredire dello scavo al piede. Di conseguenza si determinano gli spostamenti orizzontali e le sollecitazioni (momento flettente e taglio) indotte nell'elemento strutturale dall'esecuzione dello scavo.

Pertanto a conclusione delle iterazioni si verificano sia le condizioni di sicurezza nei riguardi dello SLU sia nei riguardi dello SLE.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 4/23

3. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA GEOTECNICO

Nel seguito si illustrano le verifiche geotecniche della paratia di sostegno che delimita l'area ribassata dal lato Nord della GNAM, a ridosso della Manica Lunga.

Come indicato negli elaborati del presente progetto di demolizione, questa struttura è formata da una paratia principale, con doppia fila di pali a quinconce, e da una seconda paratia di pali, che interessa un fronte più corto, formata da un'unica fila di pali. La struttura di contenimento principale, che è parallela al confine Nord, ha pali con diametro di 0.8 m posti ad interasse di 0.9 m e secondo due file sfalsate; la lunghezza dei pali è pari a 15 m e 16 m, inclusa la trave di cordolo in testa. La paratia più corta, parallela al confine Est, ha un'unica fila di pali, anch'essi con diametro di 0.8 m. L'insieme delle due paratie forma una spezzata che delimita, di fatto, i due bordi dell'incompleto corpo di fabbrica da demolire, usualmente denominato "il Mostro".

E' probabile che la paratia principale, seppure non vincolata ai telai metallici costituenti l'ossatura dell'edificio da demolire ("il Mostro"), possa interagire con questo fabbricato, ancorché in misura contenuta, ad esempio per contatto con il solaio e con le fondazioni. Considerato che la rigidità dell'insieme dei telai e della soletta di copertura è alquanto ridotta rispetto alle azioni orizzontali, è ragionevole ipotizzare che la demolizione del fabbricato ("il Mostro") non produrrà variazioni sostanziali al regime degli sforzi e degli spostamenti della paratia, quindi al comportamento globale del sistema geotecnico costituito dall'insieme della struttura di sostegno e dei terreni a monte ed a tergo di questa. Per tale motivo è probabile che la paratia abbia comportamento assimilabile a quello delle opere di sostegno a sbalzo, forse intermedio fra queste e quelle ancorate.

Per consentire la demolizione in sicurezza del relitto corpo di fabbrica costituente "il Mostro", è stato previsto di vincolare la paratia mediante una fila di tiranti, posti ad interasse di 2.7 m, e realizzati prima di iniziare i lavori di demolizione. In fase di completamento, inoltre, si presume che sarà realizzata una soletta sul fondo scavo, da vincolare saldamente alla paratia ed ai pali di fondazione del "mostro"; infatti, gli elementi metallici verticali sono immorsati a plinti fondati su pali.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 5/23

Nel seguito, si richiamano, seppure nelle linee generali, i criteri che si adottano per eseguire le verifiche di sicurezza delle paratie, inquadrati nel contesto dell'attuale normativa (DM2008).

Successivamente, si presenta il modello geotecnico del sottosuolo al quale si è fatto riferimento per sviluppare le verifiche di sicurezza. In particolare tale modello è stato definito sulla base di conoscenze pregresse e dati di letteratura riguardo la successione dei terreni presenti nell'area e le loro caratteristiche fisiche e meccaniche.

Infine si presentano i risultati delle analisi geotecniche; queste ultime sono state eseguite con riferimento alla situazione più gravosa, che riguarda la paratia principale.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 6/23

4. CRITERI GENERALI PER ESEGUIRE LE VERIFICHE GEOTECNICHE

Come già richiamato in precedenza, le verifiche geotecniche della paratia sono sviluppate, nel rispetto della normativa vigente, con l'obiettivo di controllare che siano sempre garantite le condizioni di sicurezza nei riguardi dei diversi stati limite ultimi (SLU) che possono interessare l'opera geotecnica. In pratica, per ciascuno dei possibili SLU si verifica che sia sempre soddisfatta la condizione $R_d \geq E_d$ laddove questi due simboli indicano, rispettivamente, i valori di progetto delle resistenze (R_d) e delle azioni (E_d) che possono causare uno SLU, ovvero gli effetti delle azioni.

Il margine di sicurezza nei riguardi del generico SLU è espresso dai coefficienti di sicurezza parziali. In dipendenza dello specifico approccio di calcolo, questi coefficienti sono applicati alle azioni (amplificate), alle azioni o forze resistenti (ridotte), alle resistenze (o parametri di resistenza) dei materiali (ridotte), secondo opportune combinazioni.

Nel contesto della normativa adottata, ai valori delle grandezze fisiche e dei parametri meccanici che sono stati desunti dalle indagini sui terreni ovvero dalla letteratura tecnica per terreni simili a quelli in esame, si attribuisce il significato di "valore caratteristico" (pedice k). Analogamente, ai valori delle medesime grandezze e parametri utilizzati nei diversi modelli di calcolo, ricavati dai corrispondenti valori caratteristici dopo l'applicazione dei coefficienti di sicurezza, si attribuisce il significato di "valore di progetto" (pedice d).

A tale schema concettuale, si fa riferimento, nel seguito, per distinguere i valori caratteristici da quelli di progetto, anche nel caso in cui tale distinzione non è esplicitata con l'uso dei due pedici "k" (caratteristico) o "d" (progetto).

Stati limite e criteri generali per le verifiche geotecniche

Nel contesto del presente lavoro si fa riferimento solo allo SLU di tipo geotecnico (GEO) che si sviluppa con il collasso dell'opera per rotazione intorno a un punto (atto di moto

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 7/23

rigido).

Con riferimento a questo meccanismo, le analisi sono sviluppate adottando una sola serie di valori dei coefficienti di sicurezza, in pratica i valori finalizzati alla verifica GEO; con tali coefficienti sono state anche ricavate le sollecitazioni di taglio e momento indotte negli elementi resistenti dalle spinte del terreno a tergo ai fini delle verifiche di sicurezza delle sezioni resistenti; quindi le verifiche di sicurezza di tipo strutturale (STR), nei riguardi dello SLU per raggiungimento della resistenza del calcestruzzo e dell'acciaio.

In merito a tale scelta, si segnala che le condizioni di sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi di tipo idraulico, UPL e HYD, sono sempre soddisfatte. Infatti, il pelo libero della falda si attesta a quote prossime alla base dell'opera di sostegno; di conseguenza, la differenza di livello fra monte e valle non origina alcun moto di filtrazione al di sotto dell'opera né attraverso lo spazio fra pali adiacenti. Pertanto non si analizzano gli SLU per "instabilità del fondo scavo in terreni a grana fine in condizioni non drenate", né per "instabilità del fondo scavo per sollevamento", né per "sifonamento del fondo scavo".

Analogamente, si considerano soddisfatte le condizioni di sicurezza nei riguardi degli stati limite ultimi di tipo GEO che si sviluppano con il raggiungimento del collasso per carico limite verticale ed in seguito ad una instabilità globale, quindi instabilità dell'insieme dell'opera e dei terreni interagenti con questa, dal lato di monte e di valle dell'insieme, sotto la quota di fondo scavo.

A questo riguardo si fa osservare che la lunghezza totale dei pali della paratia è $H_{tot} = 16$ m e che al di sotto del fondo scavo i pali si immorsano per circa 10 m nei limi travertinosi, sin quasi il tetto delle ghiaie; tale lunghezza di 10 m è più che sufficiente affinché si sviluppino la resistenza laterale ed alla base necessarie per contrastare il peso proprio del palo, il peso della trave di cordolo, le modeste componenti verticali delle spinte del terreno a tergo.

Si fa rilevare, inoltre, che l'altezza dello scavo è relativamente contenuta, in confronto con la resistenza al taglio dei terreni a tergo ed a valle della paratia, della profondità di infissione dei pali, della geometria dell'area di scavo, alquanto confinata, della presenza

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 8/23

della struttura della manica lunga e dell'originario edificio della galleria.

Con riferimento a questo specifico SLU, stabilità globale, si deve osservare che l'area di imposta del Mostro è confinata fra la manica lunga, l'auditorium, la corta paratia di pali tracciata secondo una direzione perpendicolare a quella più lunga. Questa geometria è prettamente tri-dimensionale, ne discende un sensibile beneficio nei riguardi delle condizioni di stabilità. Inoltre, dopo avere raggiunto la quota di progetto, si prevede il getto di una soletta di c.a. immorsata contro la paratia ed i pali di fondazione dell'attuale Mostro.

Si precisa che in questa fase non si è tenuto conto di alcuno stato limite ultimo di collasso, di tipo GEO e STR, relativo al sistema di ancoraggio, insieme dei tiranti e della trave di ripartizione, in quanto tali strutture sono dimensionate con ampi margini di sicurezza.

Si segnala, infine, che non sono state eseguite verifiche nei riguardi degli SLE poiché, a tergo della paratia, non sono presenti strutture né manufatti sensibili agli spostamenti; in ogni caso è stato verificato che tali spostamenti risultassero sensibilmente contenuti.

Parimenti, è stata rimandata ad una successiva fase la verifica in presenza di azioni sismiche, in quanto gli spostamenti sono risultati ridotti e le azioni nei tiranti ben al di sotto delle rispettive resistenze.

Approcci di progetto

In accordo con la normativa vigente, la verifica di sicurezza nei riguardi del collasso per rotazione intorno a un punto dell'opera (atto di moto rigido), si sviluppa adottando le due seguenti combinazioni dei coefficienti di sicurezza (verifica GEO, verifica STR), come indicato di seguito:

A) Approccio 1, Combinazione 1 (A1+M1+R1);

in tal caso sono unitari i coefficienti di sicurezza (M1) che si applicano ai valori caratteristici dei parametri di resistenza del terreno (γ_M) ed alle azioni (R1) resistenti

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 9/23

(γ_R); assumono i valori massimi i fattori amplificativi (A2) delle azioni, pari ad 1.3 per le azioni permanenti sfavorevoli e pari ad 1.5 per quelle variabili sfavorevoli;

B) Approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2);

in questo caso i coefficienti di sicurezza (γ_M) che si applicano ai valori caratteristici dei parametri di resistenza del terreno (M2), sono maggiori dell'unità e, rispettivamente, pari a $\gamma_{\phi'} = 1.25$ ed a $\gamma_{c'} = 1.25$, per ricavare i corrispondenti valori di progetto; sono ancora unitari i coefficienti di sicurezza (γ_R) che si applicano alle azioni resistenti (M2); hanno il valore minimo, invece, i fattori amplificativi (A2) delle azioni pari ad 1.0 per le azioni permanenti sfavorevoli e pari ad 1.3 per quelle variabili sfavorevoli.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 10/23

5. MODELLO DI SOTTOSUOLO PER L'ANALISI GEOTECNICA

Come indicato in precedenza l'assetto stratigrafico del sottosuolo in corrispondenza della paratia, è stato ricostruito sulla base dei dati raccolti in occasione di altre campagne di indagini geotecniche che hanno interessato i medesimi depositi che si rinvengono nell'area della galleria.

Interpretando le informazioni disponibili nel quadro generale delle conoscenze inerenti l'assetto geologico della porzione di territorio comprendente il complesso museale in esame, è stato ricostruito il modello di sottosuolo che si descrive sinteticamente di seguito.

Coltre superficiale e materiali di riporto

Questi terreni non interagiscono direttamente con la paratia, in quanto rimangono confinati allo spessore a tergo dell'originario muro di sostegno che delimita il confine Nord dell'area di pertinenza della galleria.

Ai fini delle analisi geotecniche, la presenza di questi terreni superficiali è stata assimilata, a vantaggio di sicurezza, ad un sovraccarico uniformemente ripartito (q) che agisce su tutto il piano limite a monte della paratia. Tale piano limite è assunto orizzontale e soggetto all'azione $q = 70 \text{ kPa}$ per rappresentare un riempimento di altezza pari a 4.0-4.5 m circa avente peso dell'unità di volume pari a $\gamma = 16-17 \text{ kN/m}^3$.

Terreni piroclastici

I terreni di origine vulcanica si rinvengono sino ad una profondità di 4 m circa sotto la testa della paratia, come si riconosce anche dall'esame della parete di scavo, ben visibile in corrispondenza del piano di fondazione del Mostro.

Nell'ambito di questo deposito piroclastico si distinguono essenzialmente due tipi di materiali, caratterizzati da diverso grado di cementazione, in un caso debole o assente

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 11/23

(rocce sciolte) e nell'altro modesto o comunque ridotto (rocce lapidee poco resistenti a tratti quasi prive di cementazione). Alla prima classe si riconducono le sabbie medie e fini, limose o debolmente limose, ed i limi con sabbia fina o sabbiosi, talvolta debolmente argillosi, di colore marrone o marrone scuro. Alla seconda classe si riconducono le piroclastiti tufacee, a tratti debolmente cementate, che si disgregano con l'azione delle dita, e le sabbie grosse e medie addensate o molto addensate.

Ai fini della caratterizzazione geotecnica, questi terreni possono essere assimilati al medesimo materiale, dotato di una discreta rigidità e capace di mobilitare una resistenza significativa, originata da cementazione (seppure debole), forma, scabrezza ed interconnessione dei grani, pressioni interstiziali negative, o nulle.

Nel corso di precedenti indagini è stato riscontrato che i diversi materiali vulcanici esibiscono una elevata resistenza alla penetrazione, come si evince dall'esame dei risultati di prove CPT e di prove SPT ed anche dai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio (V_s) in prove sismiche in foro.

Sabbie limose travertinose

Al di sotto dei materiali piroclastici e per l'intero sviluppo della paratia sono presenti i terreni di origine fluviale appartenenti ad un potente deposito che affiora lungo il Viale delle Belle Arti, poco ad Ovest di Piazza Thorvaldsen. Come è stato riconosciuto dall'esame delle carote di diversi sondaggi, il deposito è composto di terreni a grana fina e media con inclusioni di elementi lapidei grossolani di natura carbonatica. Questi clasti, che raggiungono le dimensioni di una ghiaia grossa, derivano dall'aggregazione di numerose particelle di limo e di sabbia, strettamente saldate da un cemento carbonatico; gli aggregati si rinvengono in forma di calcinelli, con geometrie irregolari, prive di spigoli, e superfici porose, ed anche di travertini fitoclastici, che raggiungono dimensioni massime variabili, in media comprese fra 20 mm e 100 mm circa.

Sotto il profilo della composizione granulometrica, questi terreni possono essere riguardati come una fitta stratificazione di materiali riconducibili a due classi. Con la

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 12/23

prima si identificano i limi argillosi debolmente sabbiosi e le sabbie con limo, accompagnate da una ridotta frazione argillosa; si tratta, quindi, di terreni a grana fina e media. Alla seconda classe si riconducono gli orizzonti ancora costituiti dai medesimi terreni a grana fina e media, ma caratterizzati, adesso, da un prevalente contenuto di clasti di natura carbonatica, anche grossolani.

La presenza di queste concrezioni conferisce al deposito una sensibile resistenza; così le pareti verticali risultano stabili anche per altezze rilevanti, come si riconosce lungo la vicina fronte di scavo fra il Viale delle Belle Arti ed il Viale Bruno Buozzi.

Alla resistenza contribuiscono, inoltre, la specifica composizione granulometrica, caratterizzata da un moderato grado di assortimento, ed il grado di saturazione, sempre alquanto ridotto, al quale si associano elevate pressioni interstiziali negative.

Pressioni interstiziali

La distribuzione delle pressioni interstiziali non ha influenza con riferimento alle verifiche geotecniche della paratia. Infatti, come evidenziato da sondaggi eseguiti nel passato, il livello della falda si raggiunge, mediamente, alla punta dei pali che costituiscono l'opera di sostegno.

Inoltre è ragionevole assumere che tale livello possa oscillare per risalire di circa un metro sopra la punta dei pali ovvero deprimersi della medesima quantità circa al di sotto della punta. A queste profondità la presenza della falda ha effetti trascurabile sullo stato di sollecitazione e di deformazione della struttura di contenimento.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 13/23

6. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI TERRENI

Per sviluppare la caratterizzazione meccanica dei terreni che interagiscono con la paratia si è fatto riferimento ai risultati delle precedenti campagne di indagini e dei dati riportati nella letteratura tecnica per terreni simili a quelli in esame.

Interpretando unitariamente le informazioni raccolte, e sulla base di un processo di analisi e sintesi dei diversi dati disponibili, sono stati fissati i valori caratteristici dei parametri geotecnici che si riportano nella Tab. I. A tali valori si fa riferimento per definire la resistenza a rottura e la risposta ai carichi dei terreni che interagiscono con l'opera di sostegno.

Per quanto riguarda il peso dell'unità di volume dei terreni, si segnala che sono stati determinati valori diverse, seppure essenzialmente a cavallo di $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$ circa. Per tale motivo, con un approccio cautelativo, si è ritenuto accettabile fissare un valore di γ costante, ponendo $\gamma = 18.0 \text{ kN/m}^3$ per tutti i terreni lungo la paratia, indipendentemente dal grado di saturazione.

Resistenza a rottura

Per quanto attiene i parametri di resistenza al taglio, si è proceduto tenendo conto, preliminarmente, della posizione della falda, quindi della possibilità di assimilare i diversi terreni ad un mezzo secco.

Inoltre, si è assunto valido il noto modello di Mohr-Coulomb, con involucro di rottura lineare definito mediante i due noti parametri, la coesione efficace c' e l'angolo di attrito efficace ϕ' , rispettivamente intercetta della retta di rottura sull'asse delle ordinate (asse τ) ed angolo di tale retta rispetto all'orizzontale.

Infatti, per la posizione della falda e per la natura dei terreni le verifiche geotecniche si sviluppano solo con riferimento alle condizioni drenate.

In definitiva, con un approccio prudente, si è ritenuto accettabile adottare le seguenti coppie dei valori caratteristici (pedice k) e di progetto (pedice d) dei parametri di

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 14/23

resistenza al taglio:

Terreni piroclastici (da z = 0.0-4.0 m)

Valori caratteristici: $c'_k = 20 \text{ kPa}$ $\phi'_k = 35^\circ$

Valori di progetto: $c'_d = 15 \text{ kPa}$ $\phi'_d = 29^\circ$

Terreni limosi travertinosi superficiali (da z = 4.0-10.0 m)

Valori caratteristici: $c'_k = 10 \text{ kPa}$ $\phi'_k = 35^\circ$

Valori di progetto: $c'_d = 8 \text{ kPa}$ $\phi'_d = 29^\circ$

Terreni limosi travertinosi profondi (da z = 10.0-16.0 m)

Valori caratteristici: $c'_k = 15 \text{ kPa}$ $\phi'_k = 35^\circ$

Valori di progetto: $c'_d = 12 \text{ kPa}$ $\phi'_d = 29^\circ$

Rigidezza

Per la stima della rigidezza dei terreni a tergo ed a valle dell'opera di contenimento si è fatto riferimento ai valori di velocità di propagazione delle onde di taglio, acquisiti mediante prove down-hole eseguite all'interno di fori di sondaggio che hanno attraversato i medesimi depositi vulcanici e travertinosi rinvenuti in corrispondenza dell'area di imposta della galleria.

In pratica, si è proceduto interpretando i diversi dati disponibili allo scopo di ricavare un valore medio sufficientemente rappresentativo della velocità di propagazione delle onde di taglio all'interno di ciascuno strato.

Quindi, per ricavare i valori dei parametri di rigidezza, relativi ai bassi livelli di

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 15/23

deformazione, quali si associano alla propagazione delle onde nel terreno, sono state applicate le note relazioni dell'elasticità lineare:

$$G_0 = \rho (V_S)^2 \quad E_0 = [2 (1 + \nu)] G_0$$

In tali relazioni γ e ν indicano, rispettivamente, la densità ed il coefficiente di Poisson dei terreni che interagiscono con l'opera di sostegno, assunti costanti a monte ed a valle e mediamente pari a $\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$ e $\nu = 0.33$.

In considerazione della marcata non linearità del comportamento meccanico dei terreni, i valori dei moduli di rigidezza, G_0 ed E_0 da utilizzare nello studio dell'interazione tra la paratia ed i terreni devono essere opportunamente ridotti. Con tale riduzione si ricavano i moduli di rigidezza che rappresentano la risposta del terreno allorché si esegue lo scavo e le deformazioni del sistema geotecnico, opera-terreni, attingono i valori della condizione di esercizio.

In accordo con le indicazioni di letteratura, e tenuto conto della geometria e caratteristiche strutturali della paratia, si è ritenuto opportuno, cautelativamente, adottare un coefficiente di abbattimento compreso nel campo 0.30-0.35.

Terreni piroclastici (da z = 0.0-4.0 m)

Come si evince dai risultati di indagini pregresse, con le misure eseguite nei terreni vulcanici intercettati a profondità dal piano di campagna comprese fra 3.0 m ed 8.0 m circa, si determinano velocità delle onde di taglio V_S crescenti con la profondità. Infatti, a partire da un valore minimo dell'ordine di $V_S = 100 \text{ m/s}$ tale velocità si incrementa sino a valori mediamente compresi nel campo $V_S = 230-430 \text{ m/s}$ circa. Si è osservato, inoltre, che a profondità dal piano di campagna maggiori di 4 m circa ed in terreni vulcanici asciutti la velocità delle onde di taglio tende a valori dell'ordine di $V_S = 300-400 \text{ m/s}$ ed anche maggiori.

Sulla base di tali considerazioni si è ritenuto giustificato porre:

Velocità onde di taglio: $V_S = 300 \text{ m/s}$ $\nu = 0.33$

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 16/23

$$G_0 = (\rho) (V_S)^2 = 162 \text{ MPa} \quad E_0 = 2 (1 + \nu) (G_0) = 431 \text{ MPa}$$

$$G = 0.3 (G_0) = 48 \text{ MPa} \quad E = 0.3 (E_0) = 129 \text{ MPa}$$

$$E_{cv} = 120 \text{ MPa} \quad E_{ur} = 150 \text{ MPa}$$

Avendo indicato con E_{cv} e con E_{ur} , rispettivamente, i valori dei moduli di rigidezza che si utilizzano per descrivere la risposta del terreno nelle due condizioni, quella di primo carico o di carico vergine e quella di scarico e ricarico, come avviene in condizioni di sovraconsolidazione.

Limi travertinosi (da z = 4.0-16.0 m)

Facendo ancora riferimento a risultati di indagini pregresse, si segnala che mediante le misure di velocità di propagazione delle onde di taglio sono stati ottenuti, per questi terreni a grana fina e media con concrezioni, valori di V_S compresi nell'intervallo $V_S = 365-444 \text{ m/s}$.

In generale la velocità delle onde aumenta all'aumentare dello stato tensionale efficace, come avviene in presenza di pressioni interstiziali negative, quindi allorché il grado di saturazione S si riduce, e tende a ridursi all'aumentare di S , per la progressiva riduzione della suzione.

Muovendo da tali osservazioni si è ritenuto accettabile, con un approccio prudente, adottare i seguenti valori di V_S , scelti in modo tale da distinguere due orizzonti (superiore ed inferiore) per tenere conto di un moderato aumento di rigidezza con la profondità a seguito dell'aumento dello stato tensionale efficace, come di seguito:

$$\text{da } z = 4.0-10.0 \text{ m:} \quad V_S = 350 \text{ m/s} \quad \nu = 0.33$$

$$G_0 = (\rho) (V_S)^2 = 220 \text{ MPa} \quad E_0 = 2 (1 + \nu) (G_0) = 585 \text{ MPa}$$

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 17/23

$$G = 0.3 (G_0) = 65 \text{ MPa} \quad E = 0.3 (E_0) = 175 \text{ MPa}$$

$$E_{cv} = 170 \text{ MPa} \quad E_{ur} = 200 \text{ MPa}$$

$$\text{da } z = 10.0\text{-}16.0 \text{ m} \quad \text{Velocità onde di taglio: } V_S = 375 \text{ m/s} \quad \nu = 0.33$$

$$G_0 = (\rho) (V_S)^2 = 250 \text{ MPa} \quad E_0 = 2 (1 + \nu) (G_0) = 670 \text{ MPa}$$

$$G = 0.3 (G_0) = 75 \text{ MPa} \quad E = 0.3 (E_0) = 200 \text{ MPa}$$

$$E_{cv} = 200 \text{ MPa} \quad E_{ur} = 220 \text{ MPa}$$

z (1)	Terreni	γ (2)	c' (3)	ϕ'	c_u	E_{cv} (4)	E_{ur} (4)
0.0 – 4.0	Piroclastiti	18	20	35°	----	120	150
4.0 – 10.0	Limi travertinosi	18	10	35°	----	170	200
10.0 – 16.0	Limi travertinosi	18	15	35°	----	200	220

z (1)	Terreni	γ (2)	c' (3)	ϕ'	c_u	E_{cv} (4)	E_{ur} (4)
0.0 – 4.0	Piroclastiti	18	15	29°	----	120	150
4.0 – 10.0	Limi travertinosi	18	8	29°	----	170	200
10.0 – 16.0	Limi travertinosi	18	12	29°	----	200	220

(1) Profondità (m), positiva verso il basso, calcolata a partire dalla testa paratia; (2) Peso dell'unità di volume (kN/m³); (3) Coesione efficace (kPa); (4) Modulo di elasticità longitudinale relativo al livello di deformazione atteso (MPa; E_{cv} per la condizione di primo carico o carico vergine; E_{cv} per la condizione di scarico e ricarico);

Tab. I – Caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni in corrispondenza della paratia, utilizzate per sviluppare le verifiche geotecniche; sopra: valori caratteristici (M1); sotto: valori di progetto, ridotti applicando i coefficienti di sicurezza (M2)

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 18/23

7. VERIFICHE GEOTECNICHE DELLA PARATIA DI PALI

Per la verifica delle condizioni di sicurezza della paratia di pali nei riguardi dello SLU che si sviluppa con la rotazione rigida della struttura verso valle, si è fatto riferimento ad uno schema bidimensionale che riproduce la geometria descritta negli elaborati grafici.

In pratica, il calcolo si sviluppa nell'ipotesi di stato piano di deformazione, tenendo conto che l'opera di contenimento deve rimanere in equilibrio sotto le spinte del terreno a tergo, sfruttando la resistenza dei materiali presenti dal lato di valle.

Quindi, per ricavare le sollecitazioni (momento flettente e taglio) indotte dall'esecuzione dello scavo nell'elemento strutturale, si utilizza una procedura di calcolo automatico, implementata nel codice commerciale Paratie. Sviluppando le analisi con tale codice di calcolo, la risposta dell'opera di sostegno è modellata tenendo conto del progressivo accumulo delle deformazioni nel corso delle diverse fasi esecutive. In pratica, il calcolo si sviluppa mediante un procedimento iterativo, finalizzato alla ricerca della condizione di equilibrio del complesso terreno-struttura, tenendo conto di eventuali stratificazioni orizzontali e, dove necessario, dei successivi livelli di approfondimento del fondo scavo.

Il processo iterativo, con il quale si determinano le spinte sull'opera e gli spostamenti dei punti di questa, prende le mosse dalla condizione di riposo e tiene conto del progressivo incremento dello spostamento della struttura, in seguito alla rimozione del terreno a valle, sino al raggiungimento di una situazione limite, minima o massima; a queste corrisponde, rispettivamente, la mobilitazione della spinta attiva e della spinta passiva. Quindi, nella ricerca della condizione di equilibrio fra le spinte lato monte e le azioni resistenti a valle, si tiene conto della loro dipendenza dall'entità degli spostamenti, che, di volta, sono funzione della rigidità relativa fra l'opera di contenimento ed i terreni. In tal modo è possibile modellare anche le situazioni intermedie, come avviene, ad esempio laddove è prevista l'installazione di tiranti o puntoni prima del completamento dello scavo.

Ai fini della determinazione degli spostamenti orizzontali della struttura di sostegno, e quindi delle spinte, la risposta meccanica del terreno è modellata utilizzando il noto

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 19/23

schema con molle elasto-plastiche, implementato rispetto all'originaria impostazione proposta da Winkler. La condizione di plasticizzazione si definisce, ovviamente, allorché si attinge uno stato limite, minimo o massimo.

La costante elastica delle molle, variabile in dipendenza delle caratteristiche meccaniche dei terreni interagenti con l'opera, può essere definita a priori dall'utente ovvero determinata nella procedura di calcolo automatico sulla base di un valore del modulo di elasticità longitudinale.

Per simulare il comportamento reale dei terreni, caratterizzato da una marcata non linearità ed in particolare da una differente risposta nella condizione di primo carico o carico vergine rispetto alla condizione di scarico e ricarico, si definiscono valori diversi delle costanti elastiche delle molle; in pratica si adottano due valori dei moduli di elasticità longitudinale, per distinguere la risposta in fase di primo carico o carico vergine (E_{cv}) da quella in fase di scarico e ricarico (E_{ur}).

Per tenere conto dell'interazione fra i terreni e la struttura di sostegno, in pratica della rigidità degli elementi resistenti, l'opera di sostegno è assimilata ad una trave equivalente inflessa, avente sezione trasversale orizzontale di forma rettangolare. La dimensione trasversale di questa trave si determina uguagliando l'inerzia della struttura reale a quella della trave fittizia, tenendo conto, eventualmente, della maggior rigidità di elementi metallici mediante semplici procedimenti di omogeneizzazione.

Nel caso in esame si è tenuto conto che la doppia fila di pali della paratia, aventi diametro pari a 0.8 m ed interasse pari a 0.9 m, sia assimilabile ad una struttura con spessore pari ad 1.0 m costante.

In presenza di tiranti, come nel caso in esame, si impone la congruenza dello spostamento del punto di serraggio del tirante sulla struttura di sostegno; in pratica tale punto pensato appartenente alla paratia, al terreno ed al tirante, con rigidità nota allorché siano fissate le caratteristiche geometriche e strutturali degli elementi di ancoraggio, deve avere il medesimo spostamento.

Così, utilizzando questa procedura di calcolo automatico e con i valori dei parametri

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 20/23

geotecnici definiti in precedenza (Tab. II), sono state eseguite le verifiche di sicurezza della paratia.

Le analisi sono svolte in tensioni efficaci e considerando il seguente schema di fasi esecutive:

Modalità esecutive – Step di calcolo

- 1) scavo di 4 m sotto la testa paratia, da sviluppare in due step
- 2) installazione dei tiranti inclinati verso il basso di un angolo $\alpha = 12^\circ$ rispetto all'orizzontale e tesatura al tiro di riferimento ($T_0 = 400$ kN)
- 3) scavo sino alla profondità di 7.5 m in 3 step (5.5 m, 6.5 m, 7.5 m)
- 4) applicazione delle eventuali ulteriori azioni, ad esempio azioni sismiche

Per i tiranti di ancoraggio sono state fissate le seguenti caratteristiche

- Tipo a 4 trefoli (area 139 mm^2), avente lunghezza complessiva di 20 m e bulbo con diametro minimo di 150 mm, iniettato in pressione con iniezioni selettive e ripetute; disposizione tiranti ad interasse di 2.7 m.
- Inclinazione tirante verso il basso: $\alpha = 12^\circ$ rispetto all'orizzontale.
- Piastrame, travi di ripartizione, e trecce circa 0.7 m per successivi controlli del tiro ed eventuali riprese di tensione.
- $L_{\text{libera}} = 12 \text{ m}$ $L_{\text{bulbo}} = 8 \text{ m}$
- $T_{\text{max}} = 600 \text{ kN}$ $T_{\text{Hmax}} = 590 \text{ kN}$ (componente orizzontale di Tmax)
- Tiro orizzontale iniziale applicato pari a $T_0 = 400 \text{ kN}$

A vantaggio di sicurezza non si è tenuto conto dei benefici effetti legati alla presenza della palificata di fondazione del Mostro dal lato di valle della paratia.

E' stata considerata, inoltre, la presenza del muro di sostegno originario bordo lotto e del riempimento a tergo, assimilati globalmente ad un carico verticale uniformemente distribuito pari a $q=70,00\text{kPa}$, con intensità fissa e costante indipendentemente dal particolare approccio di calcolo.

Le verifiche sono state eseguite adottando i coefficienti di sicurezza fissati secondo

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 21/23

l'Approccio 1 con la Combinazione 2 (A2+M2+R2).

Rimandando ai tabulati di calcolo che si allegano alla Relazione di calcolo, si fa osservare che gli spostamenti massimi, alla testa della paratia sono estremamente contenuti e dell'ordine di qualche millimetro. Analogamente, le forze nei tiranti subiscono incrementi, rispetto al tiro di riferimento, minori del 10% circa di tale azione iniziale.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 22/23

8. CONTROLLI E PRESCRIZIONI DI SICUREZZA

Per una verifica del comportamento della paratia, finalizzata al controllo delle condizioni di sicurezza della struttura, si ritiene opportuno prevedere l'attuazione di uno specifico piano di monitoraggio. Atteso che tale piano potrà essere definito nel dettagliato in sede esecutiva, sulla base dei dati raccolti dall'esame dei terreni estratti in corrispondenza dei tiranti e dei dati delle prove di collaudo e di creep (allungamento a carico costante), si ritiene indispensabile prevedere l'esecuzione di misure degli spostamenti di punti della paratia ed inoltre la misura della forza di tesatura nei tiranti.

Per il controllo degli spostamenti delle due paratie, quella principale (doppia fila di pali) e quella lato Est (unica fila di pali), si dovranno materializzare almeno 36 punti di rilievo, distribuiti su tre quote diverse; in pratica le mire fisse dovranno essere ubicate sulle travi di cordolo testa paratia ed a due altezze sopra il fondo scavo, $1/3$ e $2/3$ della profondità di scavo sotto cordolo. Il monitoraggio degli spostamenti potrà essere eseguito mediante semplice rilievo topografico da cadenzare in modo tale da seguire il progresso dei lavori ed una fase successiva, post operam, sufficientemente prolungata.

In linea generale si prevede una misura prima di iniziare i lavori di perforazione ed installazione dei tiranti, una misura prima di qualunque tesatura, una misura subito dopo la tesatura di tutti i tiranti, quindi una misura al giorno dopo l'inizio degli scavi di ribasso. Tale frequenza dovrà essere opportunamente modulata in funzione dell'andamento dei lavori; dovrà essere aumentata laddove si registrano spostamenti crescenti; potrà essere ridotta nel caso in cui gli spostamenti risultassero minori di quelli calcolati ed inoltre non si incrementano significativamente durante lo scavo e rimangono invariati raggiunta la profondità di progetto. Al termine dello scavo e durante la demolizione del fabbricato costituente "il Mostro" i rilievi potranno essere diradati.

Per tenere sotto controllo le azioni sulla paratia ed in particolare l'eventuale modifica della distribuzione degli sforzi sui pali per effetto della demolizione del Mostro, si prevede di installare almeno quattro celle di carico del tipo toroidali sui tiranti per ricavare l'andamento nel tempo della forza di tesatura.

LA GALLERIA	Galleria Nazionale d'Arte Moderna e Contemporanea di Roma Adeguamento strutturale e impiantistico e allestimento Ala Cosenza	Rev. 01
NAZIONALE	Progetto Esecutivo – 1° Stralcio Demolizioni di superfetazioni e rimozioni varie	Pag. 23/23

Anche in questo caso la cadenza delle letture di controllo sarà definita all'atto esecutivo; in ogni caso dovrà consentire di seguire il progresso dei lavori ed una fase successiva, post operam, adeguatamente estesa nel tempo.

Analogamente alle misure topografiche, si prevede, in linea generale, una misura all'atto della tesatura dei tiranti strumentati, una misura al giorno dopo l'inizio degli scavi di ribasso, una misura al giorno durante i lavori di demolizione del fabbricato costituente "il Mostro". Al termine delle demolizioni le misure potranno essere diradate; ad esempio si potrà prevedere una misura alla settimana e successivamente una misura al mese. In ogni caso la frequenza dei rilievi dovrà essere opportunamente modulata in funzione dei dati acquisiti e dell'andamento dei lavori; dovrà essere aumentata laddove si registrano valori crescenti della forza di tesatura; potrà essere ridotta nel caso in cui tale forza non varia.

In dipendenza dei risultati di questo controllo si potrà valutare la necessità di procedere ad ulteriori ritesature. Per tale motivo i trefoli dovranno emergere oltre la trave di ripartizione per almeno 0.7-0.8 m, al fine di rendere possibile l'installazione del martinetto di ritesatura; infatti, i martinetti sono cavi internamente per essere serrati intorno al trefolo e tale cavità ha lunghezza del medesimo ordine circa. Le trecce che emergono dalla trave di ripartizione dovranno essere protette dalla corrosione mediante idonei cappellotti di PVC.